



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA  
CALIFORNIA**



**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**

**“IDENTIFICACIÓN DE LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS DEL PLIOCENO  
CON IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL DOMINIO CENTRAL DEL GOLFO DE  
CALIFORNIA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEANÓLOGO**

**PRESENTA:**

**ANAHI ESMERALDA SILVA ALCANTAR**

**Ensenada, Baja California, Junio de 2007.**

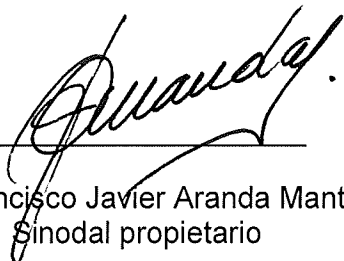
**“IDENTIFICACIÓN DE LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS DEL PLIOCENO  
CON IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL DOMINIO CENTRAL DEL GOLFO DE  
CALIFORNIA”**

**T E S I S  
QUE PRESENTA  
ANAHI ESMERALDA SILVA ALCANTAR**

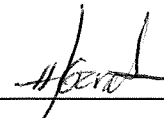
APROBADA POR



Dr. Jorge Ledesma Vázquez  
Presidente del Jurado



Dr. Francisco Javier Aranda Manteca  
Sinodal propietario



Dr. Alejandro García Gastelum  
Sinodal propietario

## RESUMEN

Se realizó un estudio para identificar cuencas sedimentarias en el Dominio Central del Golfo de California en el cual se utilizaron imágenes de satélite para la exploración geológica regional. Las cuencas sedimentarias identificadas son, Bahía de los Ángeles, San Francisquito, el Barril y Santa Ana, estas se encuentran en la Provincia Extensional del Golfo y se originaron por la apertura del Golfo de California en el Mioceno de 14 a 12 Ma, las cuales fueron generadas por dos fases principales: procesos extensionales y transtensionales, es decir por la formación del Basin and Range en el Mioceno tardío 14-12 Ma y el desarrollo del límite de las placas del Pacífico y Norte América.

Los depósitos marinos y aluviales contenidos en las cuencas son del Mioceno, Plioceno y del Cuaternario. La posición de la falla maestra delimita las cuencas de medio graben y representa el límite de inundación para el Neógeno.

El límite de inundación fue 5.8 km para la cuenca de Bahía de los Ángeles; de 5.9 km para la cuenca de San Francisquito y de 4.2 km para la cuenca de Bahía San Rafael; de 3.4 km para la cuenca del Barril y de 9 km para la cuenca de Santa Ana.

## DEDICATORIA

A mi abuelo Epifanio Silva Ramírez (q.e.p.d) por que fue un ejemplo a seguir, por haberme enseñado las cosas buenas de la vida, por haber sido más que un abuelo como un padre.

A mis padres Javier Silva Palma y Ofelia Alcantar López por darme la vida, por su amor, confianza y siempre apoyarme e impulsarme a perseguir mis sueños, por que gracias a ellos he podido hacer de este sueño una realidad.

A mis hermanos Lizbeth, Diana y Xavier por que gracias a su amor, apoyo y esfuerzo yo pude concluir esta etapa de mi vida que apenas comienza.

A mi abuela Felicitas Palma Ramírez por ser una parte importante en mi vida y creer en mí.

A mis tíos: Edgar y Rosie; Lilia y Tomas (q.e.p.d); Perla y Raymundo; y Arturo y Eva, por sus enseñanzas y motivarme seguir mis metas.

A mis sobrino Fabián por todo su amor, por hacerme feliz, por existir y por ser uno de los motivos que mi motiva a seguir adelante.

A mis primos, por ser parte de mi vida e impulsarme a luchar por lo que quiero.

A mis amigos Katy, Violeta, Esther, Keren, Duarte, Natalie, Moni, Rigo, Mitkel y Cuapanteca, Ivan, Fabian y Natalia por siempre estar ahí cuando mas lo he necesitado, por todos aquellos buenos y malos momentos pero inolvidables; por su cariño que ha hecho de mi estancia en Ensenada mas fácil. Siempre los recordare y pues a seguir construyendo sueños y hacer mas momentos inolvidables.

A Dios por ser la luz para con la que he podido seguir mi camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Jorge Ledesma Vázquez por haberme brindado esta oportunidad de mejorar mi formación profesional, por impulsarme a continuar y creer en mí.

A mis sinodales Dr. Francisco J. Aranda Manteca y Dr. Alejandro García Gastelum por sus comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo.

A Oc. Gabriel Rendón Márquez por sus sabios consejo, apoyo y dedicación para mejor mi calidad como persona y estudiante.

A mis maestros por darme las armas para continuar estudiando, enseñarme cosas nuevas y hacerme crecer como profesionista.

A Víctor Manuel Frías Camacho Técnico Asociado del departamento de Cartografía de Ciencias de la Tierra en el CICESE.

A la Facultad de Ciencias Marinas por haberme proporcionado las armas para concluir esta etapa de mi vida.

A la familia Sánchez-Medina por su apoyo y gracias a ellos tener una estancia mas agradable en Ensenada.

A la Sra. Silvia Sánchez Medina por sus consejos y ser un apoyo y todas aquellas personas que mas agradable mi vida en esta ciudad.

A todos mis compañeros de la FCM por pasar momentos divertidos y agradables.

## ÍNDICE

<b>TABLA DE FIGURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>8</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
<b>ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>13</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>20</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>33</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>34</b>

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.-</b> Provincia <i>Basin and Range</i> del oeste de Norte América y la mayor distribución de la fallas normales del Cenozoico medio a tardío, (Modificada de Henry, 1998).....	<b>2</b>
<b>Figura 2.-</b> Desarrollo del Límite entre la Placa del Pacífico y Norte América.....	<b>3</b>
<b>Figura 3.-</b> Formación de la Península de Baja California (Modificada de Stewart, 1998).....	<b>4</b>
<b>Figura 4.</b> Diagramas en bloque que resumen la formación de cuencas sedimentarias en el Golfo de California, (1) Emplazamiento de cuerpos magmáticos (2) Extensión de la corteza formando estructuras del tipo <i>Basin and Range</i> (Mioceno tardío) (Modificado de Helenes y Carreño, 1999).....	<b>5</b>
<b>Figura 5.-</b> Modelo típico de una cuenca del Proto-Golfo (Modificada de Antevine et al.,1991 Tomado de Ledesma-Vázquez, 2000).....	<b>9</b>
<b>Figura 6.-</b> Localización del área de estudio.....	<b>14</b>
<b>Figura 7.-</b> Mapa geológico del área de estudio (Tomado de Conjunto de datos Vectoriales y Geológicos, INEGI -2002).....	<b>15</b>
<b>Figura 8.</b> Imagen de Satélite LandSat ETM generada en falso color con la combinación de bandas 7, 4 y 1 de una porción de la parte norte de la península de Baja California.....	<b>23</b>
<b>Figura 9.</b> Imagen de Satélite LandSat ETM de la cuenca de Bahía de los Ángeles generada en falso color en las bandas 7,4 y 1, donde se observan las fallas y las sierras que rodean la cuenca: Sierra Libertad, Las Animas y Las Flores.....	<b>24</b>
<b>Figura 10.</b> Imagen de Satélite ASTER generada en falso color con la combinación de bandas 5,3 y 1 de una porción norte de la península de Baja California.....	<b>25</b>

**Figura 11.** Imagen de Satélite ASTER de la cuenca de San Francisquito y Bahía San Rafael generada en falso color en las bandas 5,3 y 1.....**26**

**Figura 12.** Imagen de Satélite ASTER de la cuenca del Barril generada en falso color en las bandas 5,3 y 1.....**27**

**Figura 13.** Imagen de Satélite LandSat ETM generada en falso color con la combinación de bandas 7, 4 y 1 de una porción de Baja California Sur.....**28**

**Figura 14.** Imagen de Satélite LandSat ETM de la cuenca de Santa Ana en B.C.S generada en falso color en las bandas 7,4y 1.....**29**

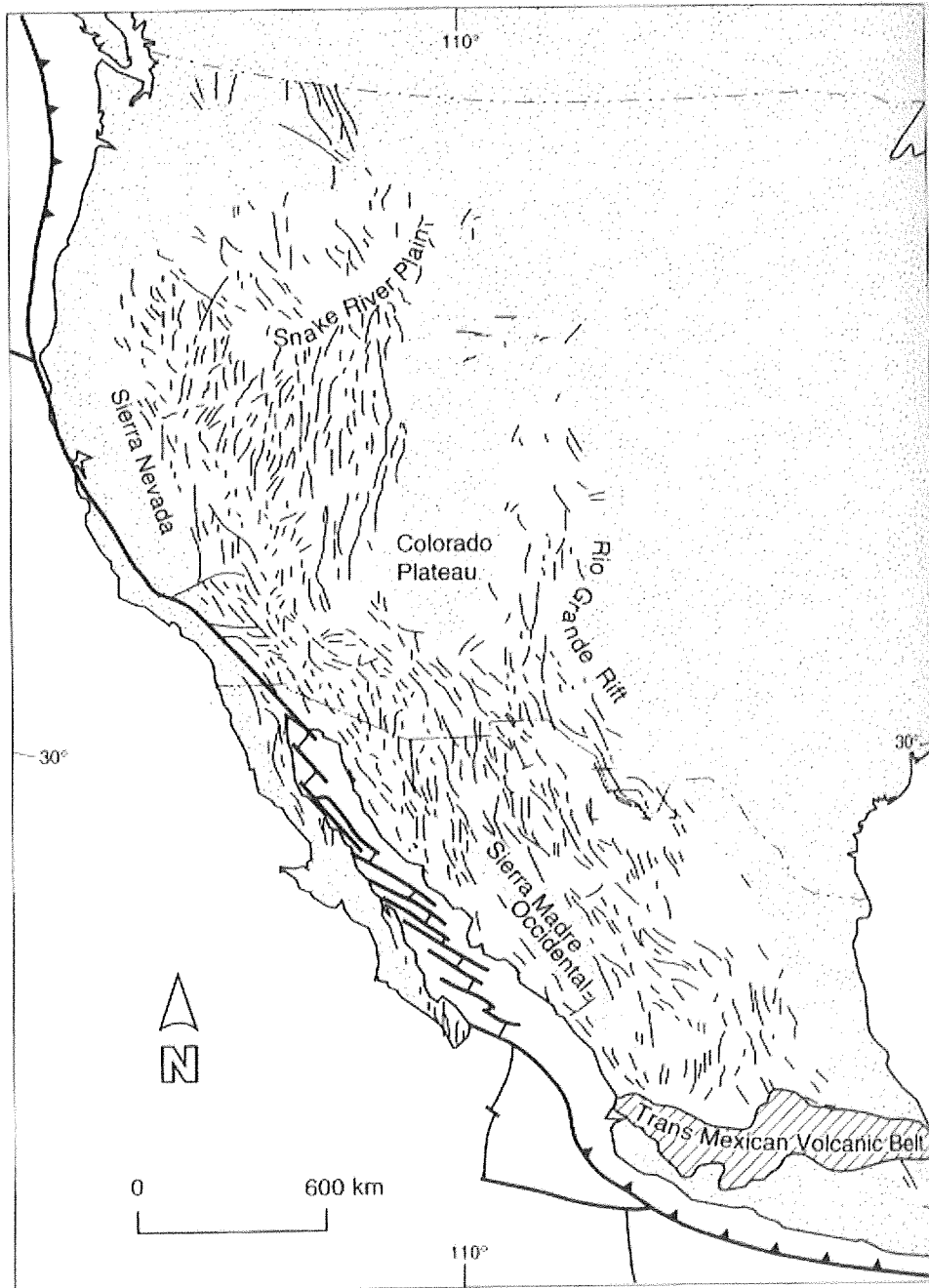
**Figura 15.** Representación de las facies de una cuenca sedimentaria (Modificado de Leeder, 1995).....**31**

## INTRODUCCIÓN:

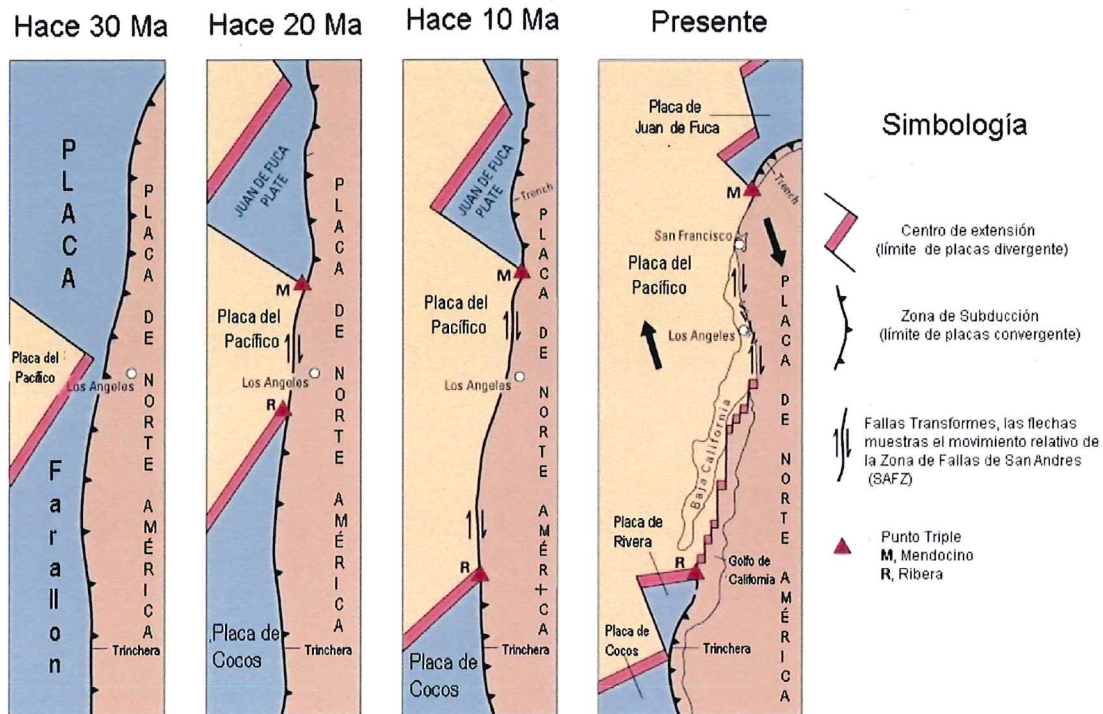
Los ambientes tectónicos y los eventos de deformación regional juegan un papel importante en el origen y evolución de cuencas sedimentarias, y en la composición de su registro sedimentario. La tectónica del borde continental de California y Baja California es el resultado de una interacción entre el continente de Norte América y la Cordillera del Pacífico Este. Del Mesozoico hasta el Terciario temprano era parte de un margen tipo andesítico caracterizado por la acumulación de secuencias de cuencas de pre-arco y mélanges en trincheras. Hace 29 millones de años (Ma), durante el Oligoceno tardío, la Cordillera del Pacífico Este empezó a migrar hacia el continente y cambio el tipo de actividad tectónica (Teng y Gorsline, 1991 en Aguirre-Bielschowsky, 2005).

La Evolución tectónica y sedimentaria de la Península de Baja California en el Neógeno se dio en diferentes etapas, pero la apertura del Golfo de California se atribuye a dos eventos secuenciales: La extensión del Proto-Golfo a mediados del Mioceno tardío (14-12 Ma) y al desarrollo de los límites de las placas del Pacífico y Norte América, alrededor de 5 Ma (Stock y Hodges, 1989). En 1972 Karing y Jansky reconocieron dos principales eventos en la formación del Golfo que involucran el desarrollo del *Basin and Range* (fig. 1) durante el Mioceno Tardío y la actividad del límite de la placa transforme entre la Placa del Pacífico y la de Norte América en el Golfo desde hace 3.5 Ma (fig. 2). Este cambio consistió en la formación de una serie de pequeños centros de dispersión conectados durante el Plioceno temprano (Stock y Hodges, 1989; Zanchi, 1994). Este sistema de fallas transformes y centros de dispersión es

considerado la actual frontera entre la Placa Norteamérica y la Placa del Pacífico (Lonsdale, 1989).



**Figura 1.** Provincia *Basin and Range* del oeste de Norte América y la mayor distribución de la fallas normales del Cenozoico medio a tardío, (Modificada de Henry, 1998).

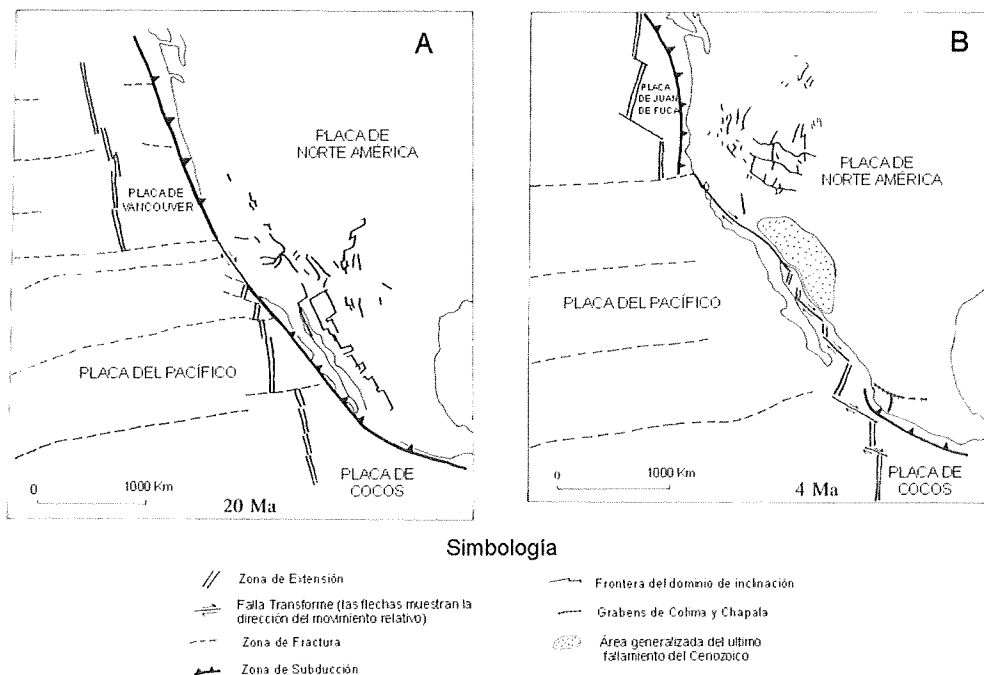


**Figura 2.** Desarrollo del Límite entre la Placa del Pacífico y Norte América (Modificada de Kious y Tilling, 2007).

La formación del Golfo de California se da en dos procesos extensionales: la primera fase que ocurrió en la parte norte del golfo con una extensión en dirección ENE-WSW (Hausback, 1984 en Rendon-Márquez, 1992). Algunos autores siguen que esta primera fase de extensión corresponde a la prolongación hacia el sur del sistema de cuencas y cordilleras o “*Basin and Range*” (Dokka y Merriam, 1982; Henry, 1989 en Rendón-Márquez, 1992). Stock y Hodges (1989) atribuyen a este proceso como una fase de extensión oblicua producida por el desarrollo de la frontera entre las placas del Pacífico y Norteamérica. La segunda fase corresponde al desarrollo

del rift oceánico en la parte central del Golfo de California que se desarrollo en el Plioceno (Curry y Moore, 1984 en Rendón-Márquez, 1992).

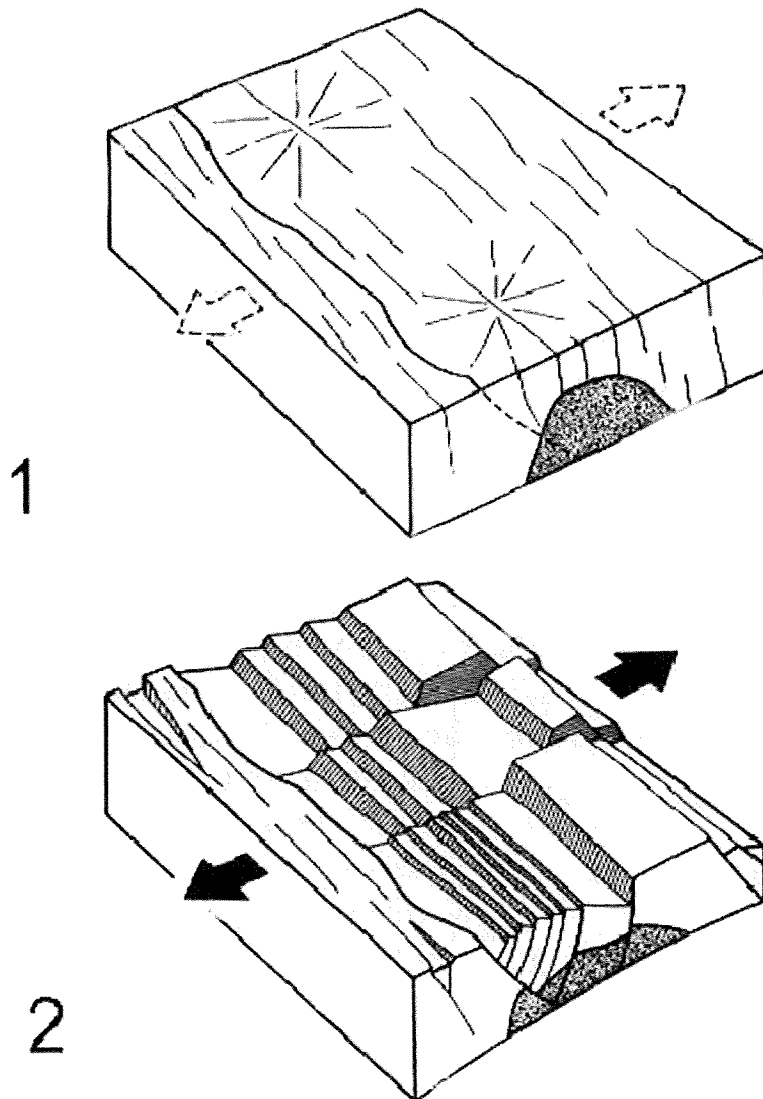
El Proto-Golfo de California se inicio durante la extensión del Mioceno medio aproximadamente de 14 a 12 Ma, sobre una angosta y alargada margen continental paralela a la pre-existente, desprendiéndose Baja California como un bloque individual y rígido(fig 3).



**Figura 3.** Formación de la Península de Baja California (Modificada de Stewart, 1998).

Durante el Mioceno tardío-Plioceno temprano, la deformación localizada en el lado este de la Provincia Extensional del Golfo, definen el rift y el ascenso que generó una incursión marina que formó el Golfo de California (Lonsdale, 1989; Stock y Hodges, 1989). Donde la etapa de fallamiento normal produjo sierras y cuencas, lo cual marcó el inicio de la formación del Proto-Golfo que se caracteriza por el establecimiento de condiciones marinas tropicales (Karing y

Jenski, 1972). En el Plioceno el Golfo de California se desarrollo por un fallamiento dextral y extensión (Winkler y Kidwell, 1996 en Ledesma- Vázquez, 2000; Helenes y Carreño, 1999) (fig. 4).



**Figura 4.** Diagramas en bloque que resumen la formación de cuencas sedimentarias en el Golfo de California, (1) Emplazamiento de cuerpos magmáticos (2) Extensión de la corteza formando estructuras del tipo *Basin and Range* (Mioceno tardío) (Modificado de Helenes y Carreño, 1999).

La formación de las cuencas sedimentarias (fig. 4) se da en zonas de extensión donde ocurren fuerzas de tensión que mueven la corteza separándola y produciendo fallas normales. Esta separación produce que bloques de corteza se extiendan y se deslicen, a lo cual se le conoce como medios grabens. De esta forma el medio graben ocupa una mayor superficie que la corteza horizontal original y la zona se va extendiendo, adelgazando la corteza y formando una depresión (Turcotte y Schubert, 2002 en Aguirre-Bielschowsky, 2005).

El origen de las cuencas sedimentarias es un elemento clave en el entendimiento de la evolución geológica de la litosfera. Por ello el estudio detallado de las mismas permitió que se diera un progreso sustancial en la comprensión de los aspectos mecánicos de la formación de cuencas sedimentarias y la respuesta isostática de la litosfera a la formación de éstas. Este progreso se ve reflejado en la abundante generación de modelos actualísticos para el estudio de las cuencas sedimentarias, que incluyen dentro de sus parámetros, procesos tectónicos, sistemas depositacionales, mecanismos de subsidencia y cronoestratigrafía (Ingersoll y Busby, 1995 en Ledesma- Vázquez, 2000).

Las cuencas sedimentarias extensionales proveen el más importante registro de la historia del adelgazamiento de la corteza terrestre y pueden contener estructuras activas durante la sedimentación y estratos que provean las delimitaciones cronológicas necesarias para fechar estructuras. Así, la geometría de las cuencas, por si misma provee información de los mecanismos y la magnitud de la extensión (Ingersoll y Busby, 1995 en Ledesma- Vázquez, 2000). Las cuencas son rellenadas por una secuencia de intervalos que

pueden reflejar depositación y no depositación (Frazier, 1974 en Ledesma-Vázquez, 2000).

Durante el Mioceno tardío las márgenes de la parte septentrional del Golfo de California actual experimentaron una deformación extensional y actividad volcánica restringida relacionada con el arco volcánico en extinción. Como consecuencia en áreas como Bahía de los Ángeles, Bahía las Animas, Isla Ángel de la Guarda y el Archipiélago de San Lorenzo, se formaron cuencas locales con influencia de incursiones periódicas de agua marina (Escalona-Alcázar et al., 2001).

Las cuencas del oeste del Golfo de California han sido bien estudiadas por diferentes autores, mientras que el este del golfo tiene cuencas han sido pobremente documentadas (Aragón-Arreola et al., 2005).

Los datos obtenidos por los sensores remotos han sido utilizados por los geólogos en forma de imágenes. La aplicación de imágenes de satélite ha sido demostrada en muchos campos, algunos tales como la agricultura, botánica, cartografía, ingeniería civil, monitoreo ambiental, geología, geografía, geofísica, análisis de recursos terrestres, oceanografía, etc. Con la utilización de las imágenes de satélite se pueden coleccionar datos los cuales pueden ser analizados para obtener información sobre objetos, áreas o algún fenómeno a investigar. Las imágenes de satélite han sido utilizadas en diferentes áreas de la geología, estas implican la interpretación y procesamiento de los datos. Los diferentes campos de la geología que utilizan las imágenes de satélite son en: Geobotánica, exploración de minerales, litología, Geología estructural, Geomorfología, Geociencias ambientales, Geología extraterrestre, Geología Glacial, etc (Siegal, B.S. & A.R. Gillespie. 1980; Lillesand y Kiefer, 1994). Las

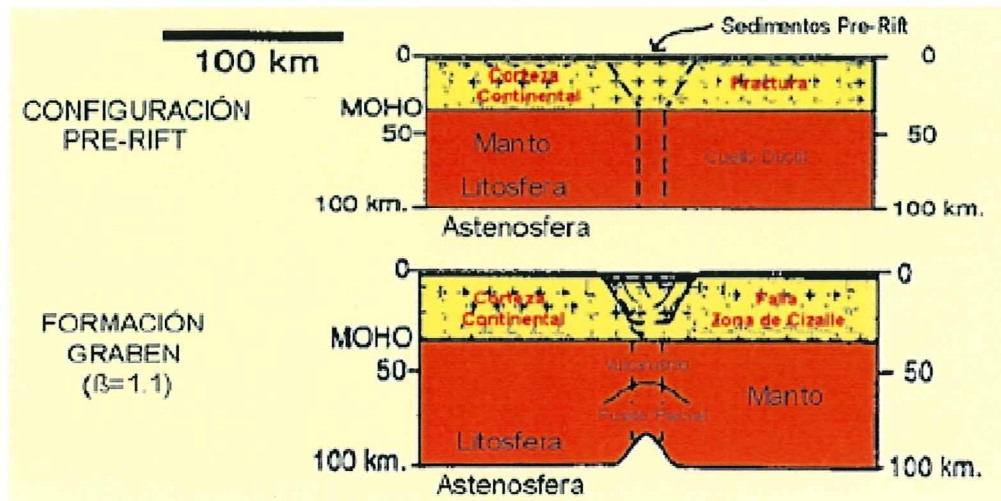
imágenes de satélite, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten generar productos cartográficos que proporcionan nuevas perspectivas en el análisis territorial, adaptándose a las necesidades del usuario (Monne et al., 1997 en García-Duga, 2000).

Algunas veces estas imágenes son adquiridas en investigaciones específicas para las necesidades particulares para realizar su fotointerpretación. En cada caso, la imagen es procesada para ser usada mejorando la visualización, en relación a las necesidades de cada geólogo.

En este estudio se utilizan herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota para caracterizar algunas de las cuencas del Dominio Central de Baja California. Donde las imágenes de satélite nos van a proveer de información para poder tener una descripción mas clara de la geomorfología de las cuencas que se formaron por la apertura del Golfo de California.

#### **ANTECEDENTES:**

Las cuencas de Bahía de los Ángeles, San Francisquito, El Barril y San Ana están relacionadas con la apertura del Golfo de California, ya que se formaron por la extensión del Golfo (*Basin and Range*) y el desarrollo del límite entre las placas del Pacífico y Norte América; por lo cual corresponden en su estructura del modelo extensional del Golfo de California (fig. 5) han sido estudiadas por varios autores, en las cuales se incluyen la cuenca de Santa Rosalía (Wilson, 1948; Wilson y Rocha, 1955), la cuenca de las Ánimas y Los Ángeles (Gastil *et al.*, 1975), la cuenca de Laguna Salada (Axen y Fletcher, 1998; Walker, 1989), la cuenca de Loreto (Zanchi, 1994; Umhoefer y Stone, 1994; Umhoefer y Stone, 1996) (Ochoa-Landín, *et al.*, 2000).



**Figura 5.** Modelo típico de una cuenca del Proto-Golfo (Modificada de Angevine et al., 1991 Tomado de Lesdema-Vázquez, 2000).

Las imágenes de satélite se han utilizado en estudios neotectónicos del norte de Baja California, donde el fallamiento joven es expresado por su geomorfología y su litología discontinua (Lee et al., 1996). Los estudios realizados en cuencas se han enfocado principalmente a su aspecto estructural y a la geología regional del área. En el caso del área de estudio la cuenca mas estudiada ha sido la de Bahía de los Ángeles, donde la mayoría de los estudios realizados se han enfocado a la geología de las islas que se encuentran en esa región.

Escalona- Alcázar y Delgado-Argote (1995) realizaron un reconocimiento geológico a lo largo de la costa occidental de Isla Ángel de la Guarda, así como un estudio fotogeológico de la misma.

En 1991-1992 inicio una prospección geológica y gravimétrica para estudiar la evolución de las cuencas aledañas a la zona del canal de Ballenas (Delgado- Argote, 2000).

Fenby y Gastil (1991) interpretaron una serie de fallas desde Bahía de los Ángeles hasta Bahía San Rafael, que tienden a converger entre punta San Francisquito y el Arco. El echado dominante del conjunto es hacia el oriente, por lo que estos autores sugirieron que en esta región se desarrollaron zonas de desprendimiento durante la fase extensional *Basin and Range* durante el Mioceno (Delgado- Argote, 2000).

Lonsdale (1989) propuso que el desarrollo de las bahías de los Ángeles, Ánimas y San Rafael puede estar asociado a la dinámica del sistema de fallas del Golfo de California.

Delgado- Argote (2000) encontró evidencias de las incursiones marinas en zonas de actividad volcánica del Mioceno temprano y medio en la parte central del Golfo de California.

La actividad volcánica del Mioceno medio esta relacionada a la extensión *Basin and Range*. Se propone que esta actividad se asocia a diques regionales emplazados en zona de rift. Las evidencias en Bahía de los Ángeles son geoquímicas, estructurales y geofísicas, mientras que en Santa Rosalía las evidencias son geofísicas (Delgado- Argote, 2000).

García-Puga (2000) realizo estudios sobre la geomorfología e hidrología superficial del área de Puertecitos y San Luis Gonzaga, apoyándose en un Sistema de Información Geográfica y un modelo de elevación, así generando cartografía especializada de la región.

Torres-Rodríguez (1994) genero un modelo geomorfológico en la región deltáica del Golfo de California, usando imágenes de satélite para la identificación de las principales unidades geomórficas que componen este sistema.

La cuenca Santa Ana se localiza en la parte centro-este de Baja California, alargada en dirección NW-SE y limitada por fallas, las cuales estuvieron activas desde el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno. Se formó por la apertura del Proto-Golfo, y fue almacenando sedimentos marinos y no marinos de la formación Boleo, con capas de tobas interestratificadas en su parte inferior. La secuencia está dividida de abajo hacia arriba en las Formaciones El Boleo, La Gloria, Infierno y Santa Rosalía. La Formación El Boleo tiene un espesor entre 200 y 300 m, y es dominada en su parte inferior por sedimentos marinos transgresivos y cuerpos evaporíticos seguidos por sedimentos clásticos en su gran mayoría no marinos con texturas progradacionales, características de un ambiente fluvio-deltaico cercano a una línea de costa. Esta secuencia clástica alcanza espesores entre 170 y 300 m, y presenta al menos tres ciclos de sedimentación bien organizados, con depósitos de grano grueso hacia la cima, con espesores entre 90 y 100 metros. Cada ciclo representa una secuencia progradacional producida probablemente por las repetidas etapas de subsidencia del piso de la cuenca de Santa Ana durante el inicio de la apertura del Golfo de California. Cada ciclo inicia con la depositación de sedimentos finos laminares en cuencas extensas con introducción periódica de flujos subacuáticos de detritos. Las facies finas de cada ciclo hospedan los cuerpos estratiformes de Cu-Co-Zn del distrito minero de Santa Rosalía. Cambios de facies, tanto laterales como verticales, están presentes en cada ciclo, variando de conglomerados y areniscas de grano grueso en facies próximas a areniscas de grano fino, caracterizadas por estratificación cruzada de bajo ángulo y estratificación laminar, alternando con limonitas y lodolitas finamente laminadas en facies distales. Al inicio de la

formación de la cuenca de Santa Ana, se desarrollaron dos depocentros antiguos localizados al nor-noroeste y al sur-sureste de la cuenca; estos depocentros fueron rellenados por sedimentos correspondientes al primer ciclo depositacional y estuvieron separados por un alto topográfico formado por las rocas volcánicas de la Formación Comondú (Ochoa-Landín, *et al.*, 2000).

No se han realizado estudios en las cuencas de San Francisquito y El Barril, sin embargo todas estas cuencas posiblemente se originaron por la apertura del Golfo de California, por lo tanto la geología del lugar muestra un patrón similar al de la cuenca de Bahía de los Ángeles y Santa Ana.

#### **HIPÓTESIS:**

La formación de cuencas sedimentarias del Neógeno se dio por el efecto extensional de la corteza originando medios grabens, que presentan una buena definición geométrica a nivel regional, lo cual va a proveer información útil para así poder tener una definición mas clara de cual fue la mayor área de inundación para el Golfo de California.

#### **OBJETIVOS:**

##### **Objetivo General:**

El presente trabajo pretende identificar las cuencas sedimentarias del Neógeno por medio de su estructura morfológica con imágenes de satélite en la región del Dominio Central del Golfo de California.

##### **Objetivos Particulares:**

1. Elaborar la cartografía estructural de la zona mediante un programa especializado en los sistemas de información geográfica (ArcView).

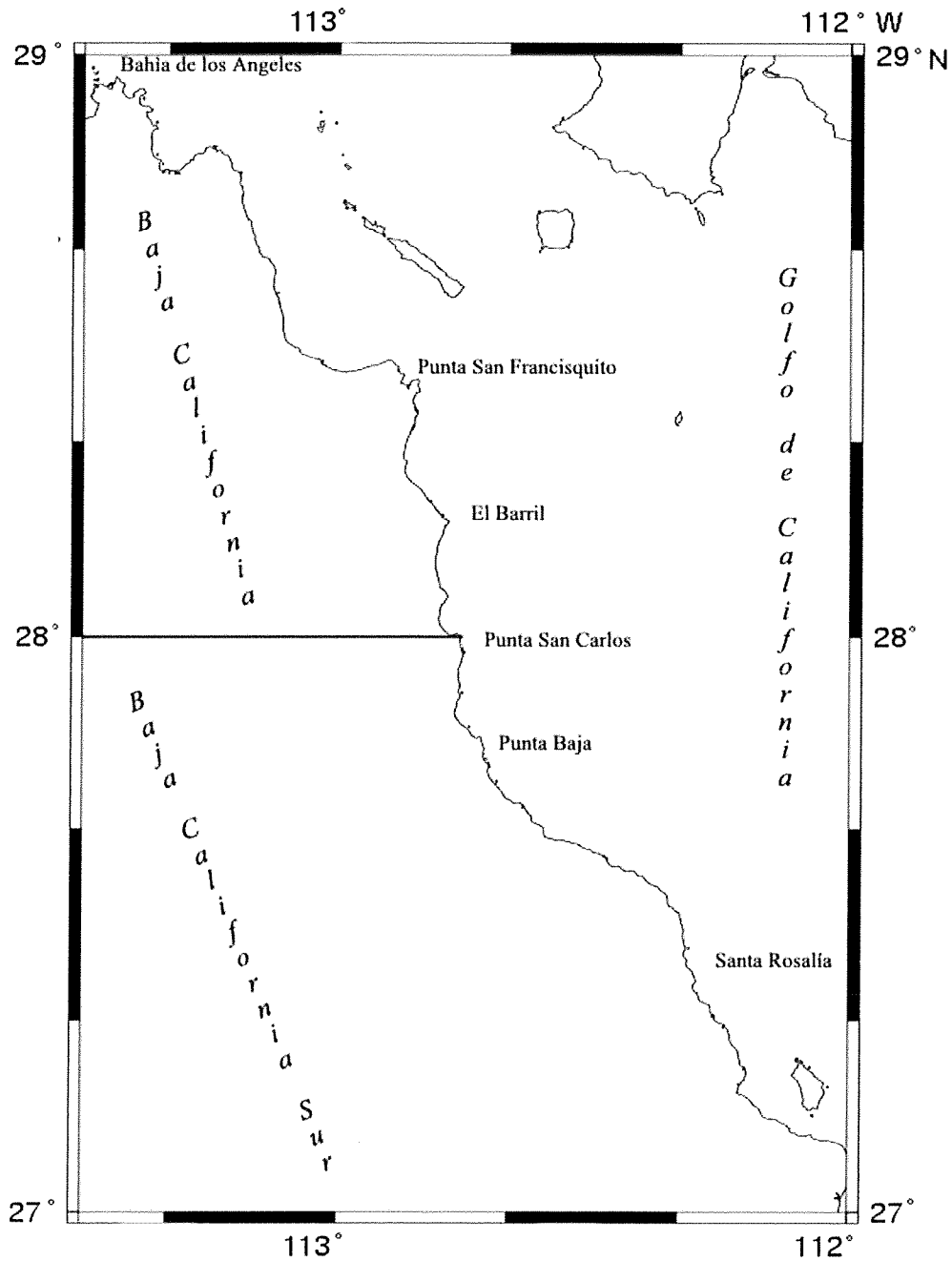
2. Identificar cual es el área de mayor inundación en cada una de las cuencas.

### **ÁREA DE ESTUDIO:**

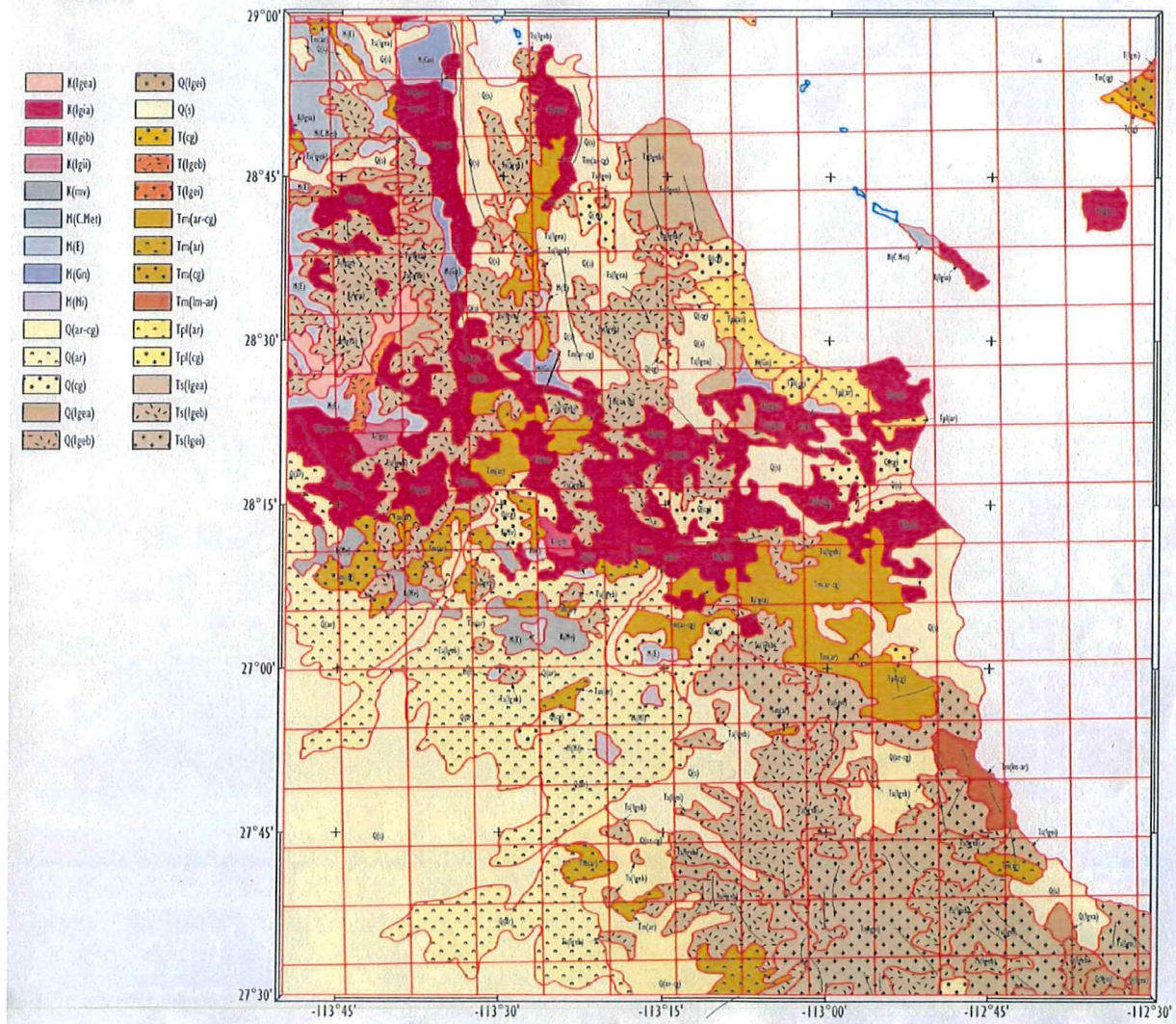
Las cuencas se localizan en la región central del Golfo de California, la cuales son: al norte Bahía de los Ángeles ubicada a 28°55'N y 113°32'W; Punta San Francisquito 28°25'N y 112°52'W y al sur El Barril 28°18'N y 112°56'W, en Baja California y hasta Punta Santa Ana 27°19'N, 112°17'W en Baja California Sur (fig. 6 y 7).

Bahía de los Ángeles (BLA) tiene una orientación NW-SE y es la bahía mas septentrional de las tres principales que se encuentran en la costa peninsular del Golfo de California (las otras dos son Bahía Concepción y Bahía de La Paz) (Danemann, 2002). Está ubicada en la costa oriental de Baja California a 640km de la ciudad de Ensenada y 450km al sur de San Felipe. Se encuentra abierta al Golfo de California frente al canal de Ballenas y colinda al este sobre el Golfo de California con la Isla Ángel de la Guarda y otras islas de menor tamaño, las cuales actúan como barreras costeras; al oeste con el poblado de Bahía de los Ángeles (Acosta-Reyes, 1989 en Iñiguez-Hernández, 2004). En BLA aflora un complejo volcanosedimentario de probable edad del Cretácico temprano intrusionado por rocas plutónicas máficas y ultramáficas, las volcánicas pueden correlacionarse con el Grupo Alisitos del norte de la península (Gastil et al., 1975). Hacia el NE aflora la porción mas austral de la provincia batolítica de Baja California del Cretácico tardío, la cual esta cubierta por rocas piroclásticas del Mioceno (Gastil et al., 1979; Sawlan, 1991) y por numerosos campos volcánicos basálticos que pueden ser tan jóvenes como

del Plio-Pleistoceno. De acuerdo a su distribución, el emplazamiento de estos últimos parece estar controlado por estructuras corticales profundas orientadas NNW (Delgado- Argote, 2000).



**Figura 6.** Localización del área de estudio.



**Figura 7. Mapa geológico del área de estudio (Tomado de Conjunto de datos Vectoriales y Geológicos, INEGI -2002).**

Santa Ana es una región de una secuencia concordante de estratos volcánicos del Mioceno inclinados más de 45° por el norte con un rumbo hacia NNW, al oeste fallas normales, anteriores a la depositación fueron cubiertas en el Plioceno temprano o arriba de la Formación Boleo en el Mioceno. Del Plioceno superior al Holoceno, el vulcanismo alcalino se debe a la tendencia de que aparecieran medio grabens con una orientación NNW, los cuales presentan unas fallas en esa misma orientación, debido al desarrollo de los límites de las márgenes de las cuencas. Wilson (1948) y Wilson y Rocha (1955) reportan numerosas fallas normales de rumbo N10°W a N45°W.

Un estudio de estrías de falla en esta área, muestra que las fallas normales de rumbo NNW del Mioceno tardío son la respuesta al esfuerzo principal ( $\sigma_h$ ) orientado al ENE y al movimiento de las fallas del Plioceno con la misma orientación pero esta más oblicua, con una dirección de  $\sigma_h$  orientada a WNW-ESE o E-S (Stock y Hodges, 1989).

La cuenca de Santa Ana está rodeada de Norte-Noreste por el campo volcánico del Plio-Cuaternario de Tres Vírgenes y la caldera la Reforma, en la parte Oeste-Suroeste por rocas volcánicas del Mioceno medio del grupo Comondú. Las rocas más antiguas que se encuentran en el área de Santa Rosalía es monzonita de biotita y cuarzo fechado como de hace 91 Ma (Schmidt, 1975). La cual corresponde a la intrusión del Batolito Peninsular en el Cretácico (Gastil, 1983; Silver y Chappel, 1988; Silver *et al.*, 1969). El relleno de la Cuenca Santa Ana consiste en rocas volcánicas de la formación Comondú, que consisten en más de 1 km de espesor de flujos subaéreos andesíticos y basálticos, tobas, brechas, aglomerados y areniscas tobaceas fechadas entre los 24 y 11 Ma (Sawlan y Smith, 1984 en Ochoa-Landín, *et al.*, 2000).

## **METODOLOGÍA:**

En la presente tesis se aplicaron varios métodos con diversas herramientas que se describen a continuación, para el análisis geomorfológico de las cuencas utilizando imágenes de satélite LandSat ETM (Enhanced Thematic Mapper) y ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer).

### **Procesamiento de Imágenes**

Para la identificación de cuencas sedimentarias se procesaron imágenes de satélite tipo LandSat ETM y ASTER. Las imágenes fueron procesadas en el laboratorio de GIS de Williams College por un software especializado (ENVI), con el cual a cada una de ellas se les realizó un análisis estadístico, el cual determino la combinación de bandas a utilizar. Las bandas que se seleccionaron son las 7,4 y 1, para las imágenes ETM; y para las ASTER 5,3 y 1 debido a que esta combinación da un mayor contraste y detalle de las imágenes, así sobresaltando las cuencas y contrastando la litología. La resolución espacial de las diferentes bandas para cada una de las imágenes es: 7-15 m; 4-30 m y 1-30 m para las imágenes ETM y para las imágenes ASTER es: 5-30 m; 3-15 m y 1- 15, debido a que la resolución es diferente en cada una de las diferentes bandas que forman la imagen se utilizo una técnica conocida como fusión de una imagen. La fusión de imágenes por sensores remotos, es un proceso que permite combinar información de distintos satélites o de diferentes sensores, de una misma zona en estudio. Su objetivo principal es integrar imágenes de distintas resoluciones espaciales y espectrales en una

sola que reúna las mejores características de ambas, obteniendo un producto híbrido de calidad útil para el fin elegido. Las imágenes generadas por esta combinación de bandas, crean una combinación de falso de color.

### **Imágenes de Falso Color**

Una imagen está constituida por un arreglo de celdas (X, Y), cada una de ellas almacenan la reflectancia electromagnética registrada por el sensor, asignándole un valor numérico digital que representa un valor de brillo en una escala (García-Duga, 2000).

Hay dos tipos fundamentales de despliegues de imágenes. Una manera es utilizando una tabla de color en tonos gris, donde el color negro le corresponde al valor 0 mientras que los valores mas altos le corresponden al blanco. El segundo método, consiste, en generar una imagen de falso color en la cual se seleccionan tres bandas espectrales a las cuales se les asigna uno de los colores primarios (azul, verde y rojo). Cuando existen más de tres canales espectrales, se pueden realizar una serie de combinaciones de los colores primarios que permiten desplegar compuestos en colores sintéticos. Esta técnica es bastante útil y comúnmente utilizada para la interpretación geológica a partir de una imagen de satélite (Richards, 1993; Vincent, 1997; Sabins, 1987 en García-Duga, 2000). Es decir la combinación de imágenes de color real esta dada por las bandas 3,2 y 1, (R,G,B) que pertenecen al espectro electromagnético visible; en las imágenes de falso color se tiene por lo menos una canal o banda en el infrarrojo, en el cual la gamma de infrarrojo es muy útil para interpretar la superficie terrestre.

## **Fotointerpretación**

Una vez procesadas las imágenes del área de estudio, se identificaron cuencas sedimentarias mediante su geometría, así también para complementar su identificación se utilizaron cartas geológicas elaboradas por la Geological Society of America (GSA) de Gastil del año 1971 con escala de 1:250'000. Así mismo con las imágenes de satélite y las cartas geológicas (GSA, 1971), se determinó la litología que se encuentra en las cuencas sedimentarias. Se procedió a la verificación de campo para corroborar la existencia de esas cuencas, así también se tomaron muestras de las unidades sedimentarias para confirmar la litología del área de estudio.

## **Elaboración de la Cartografía Especializada**

Con los resultados obtenidos anteriormente y un software especializado en el desarrollo de sistemas de información geográfica (ArcView) se elaboró la cartografía de la distribución de los sitios identificados en este estudio; con lo cual se procederá a elaborar la cartografía del área de interés, para poder obtener una descripción más clara de las cuencas sedimentarias que se originaron por la apertura del Golfo de California y así poder conocer el área de mayor inundación.

## **RESULTADOS Y DISCUSIONES:**

El procesamiento digital de imágenes de satélite es una buena alternativa para la obtención de información geológica, especialmente en zonas que son de difícil acceso o no se dispone suficiente información. Nos

proporcionan una visión sinóptica de meso y macroescala espacial, que funcionan como una herramienta para la identificación de unidades litológicas y de las cuencas.

Mediante el análisis de las imágenes de satélite se lograron identificar las cuencas sedimentarias en el Dominio Central del Golfo de California. Las cartas geológicas permitieron identificar las unidades sedimentarias en la región y fueron verificadas con el trabajo de campo. Las cuencas encontradas en la: Cuenca Bahía de Los Ángeles, Cuenca San Francisquito y Cuenca el Barril; en la parte sur la Cuenca de Santa Ana.

En las imágenes de satélite de cada una de las cuencas se pudo identificar la litología, debido a que cada tipo de roca presenta una coloración diferente dentro de la imagen, determinada por la combinación de bandas de cada imagen (ASTER, 531 y LandSat ETM 741) resalto los diferentes tipos de roca que se encuentran en cada una de las cuencas estudiadas, esto se confirmo por la verificación de campo y con ayuda de las cartas geológicas de la península. Sin embargo cabe mencionar que la litología que se observo fue solo superficial, por medio de cada una de las imágenes y las cartas geológicas de Gastil, 1971, por lo cual no se hicieron columnas estratigráficas.

Las cuencas de Bahía de Los Ángeles, San Francisquito, el Barril y Santa Ana, están relacionadas con la apertura del Golfo de California. Por lo cual son de los accidentes estructurales mayores en el Golfo de California y sus márgenes están relacionados al evento extensional *Basin and Range* del Mioceno 14-12 Ma y a la deformación asociada al sistema transforme San Andrés-Golfo de California que inició en el Plioceno (fig. 2)(Delgado-Argote, 2000).Lo que nos indica que se formaron por dos fases: procesos

extensionales y procesos transtensionales (fig. 4), por lo que corresponden al modelo típico del Proto-Golfo de California (fig. 5).

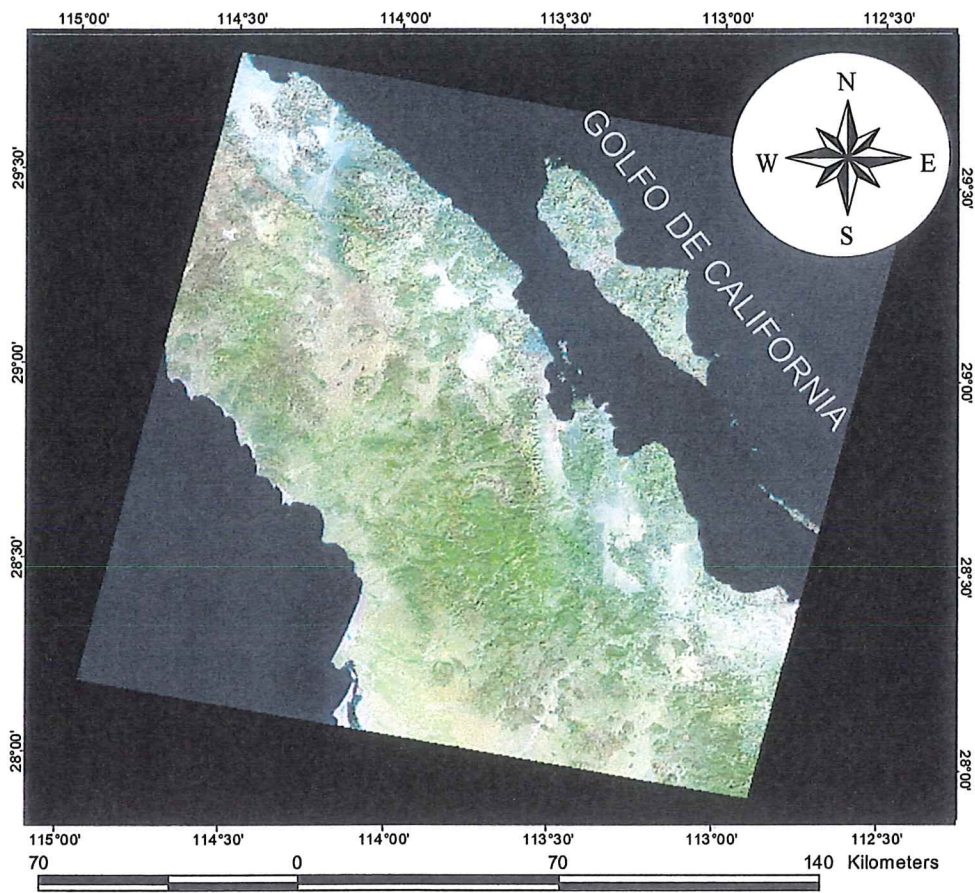
**Cuenca Bahía de Los Ángeles (BLA):** La orientación de BLA es de NW-SE (fig. 9), igual que la zona de fallamiento transforme Ballena, Partida y San Lorenzo, están orientadas NW-SE, lo cual sugiere que los regimenes de esfuerzo presentan orientación similar del eje de máxima extensión (Escalona-Alcázar y Delgado-Argote, 2000). La cuenca esta limitada de oeste a este por las sierras La Libertad, Las Flores y Las Animas. Hay rocas metasedimentarias del Devoniano las cuales son las unidades más antiguas cerca del área (Delgado-Argote y López Martínez, 2000), hay flujos andesíticos antiguos de  $18.8 \pm 1$  Ma. Los flujos andesíticos son almohadillas e incluyen entre sus cavidades areniscas indiferenciadas. Los flujos andesíticos están cubiertos por ignimbritas de  $14.0 \pm 1$  Ma y flujos basálticos de  $12.1 \pm 1$  Ma y depósitos marinos y aluviales del Plioceno y el Cuaternario que son las unidades más jóvenes en el área. El basamento metamórfico esta formado principalmente por se encuentran rocas metamórficas que fueron cubiertas por lavas andesíticas y basálticas y depósitos de toba a lo largo de la costa, así como brechas, conglomerado oligomíctico derivado de las rocas de metamórficas que son cubiertas por coquina y colonias de coral, posiblemente del Plioceno. Las rocas Metamórficas son atribuidas a la intrusión del Batolito Peninsular en el Cretácico Temprano (Delgado-Argote y López Martínez, 2000).

**Cuenca San Francisquito:** Rocas volcánicas del Neógeno, al igual que en Bahía de los Ángeles, con características litológicas parecidas (fig. 11). Se encuentran rocas metamórficas prebatolíticas, así mismo rocas volcánicas relacionadas con la intrusión del batolito, y dentro de la plutónica

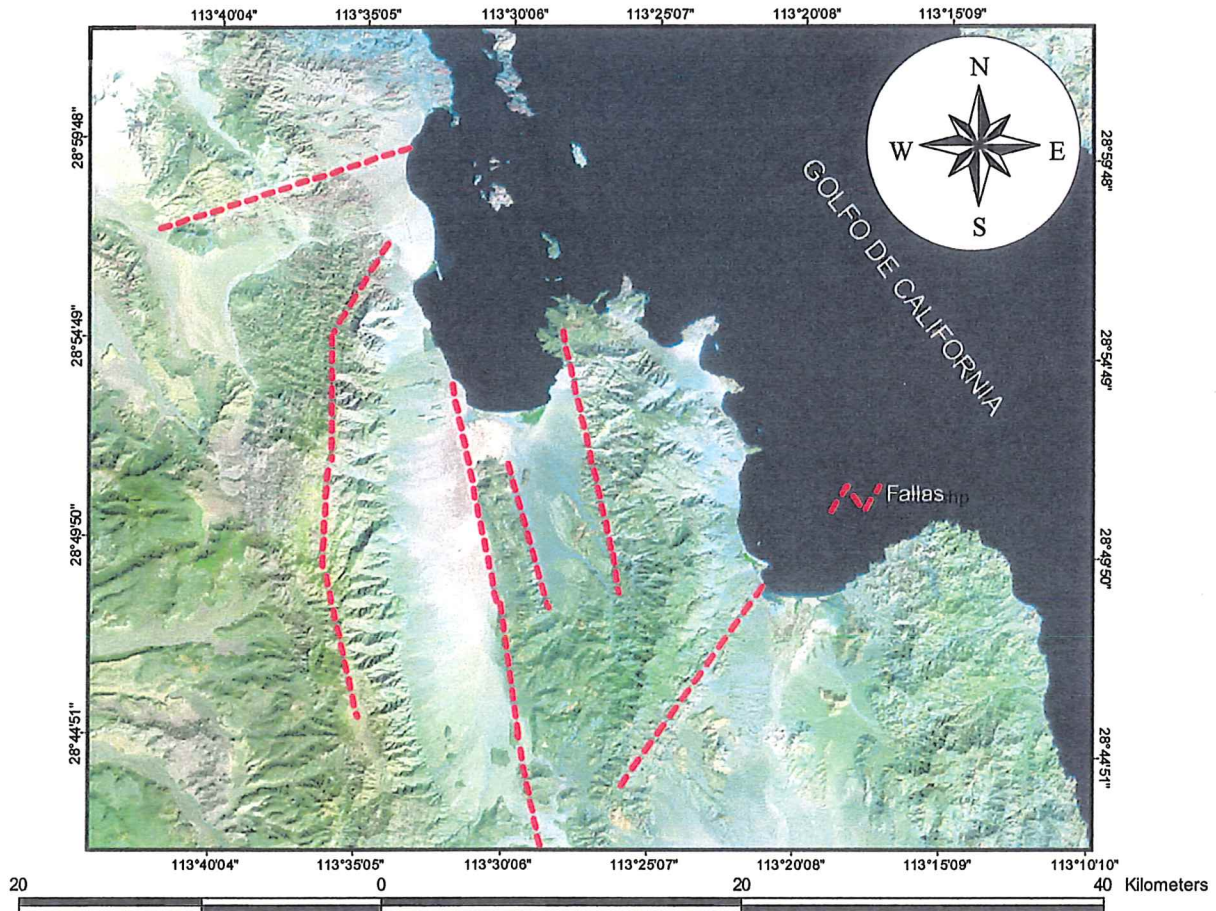
principalmente granodiorita. La cuenca se encuentra rellena por rocas sedimentarias de origen marino del Plioceno y aluvión del Cuaternario.

**Cuenca el Barril:** Se encuentran rocas volcánicas principalmente andesita, rocas graníticas del Cretácico que están relacionadas a la intrusión del batolito peninsular (**fig.12**). Presenta depósitos sedimentarios marinos del Plioceno y aluvión Plioceno y del Cuaternario.

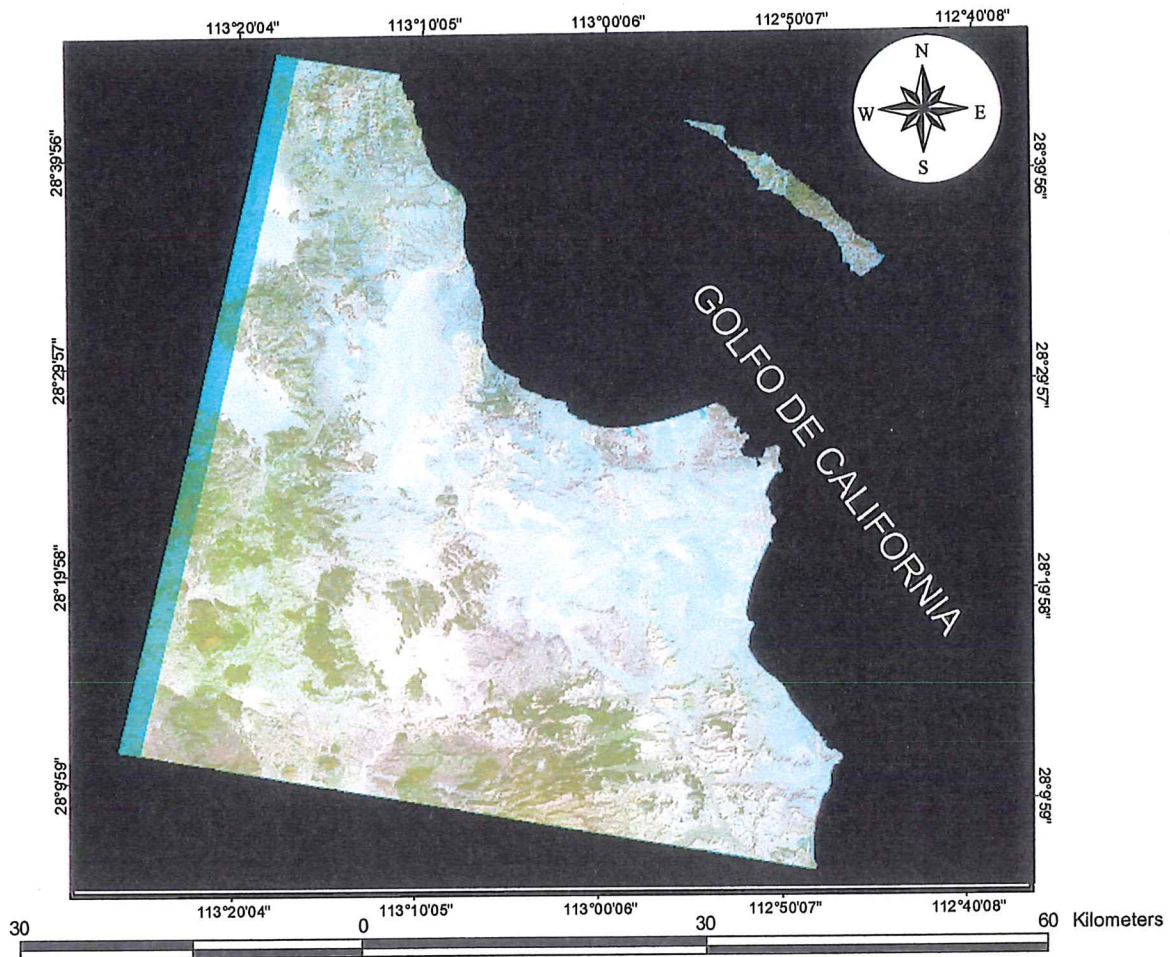
**Cuenca de Santa Ana:** En la cuenca se encontraron depósitos de caliza marina basal, que sobreyacen a rocas volcánicas calcialcalinas de a Formación Comondú, con edades de entre 24 a 12 Ma y depósitos sedimentarios marinos y aluviales del Plioceno, característicos de un ambiente fluvio-deltaico cercano a una línea de costa (**fig.14**).



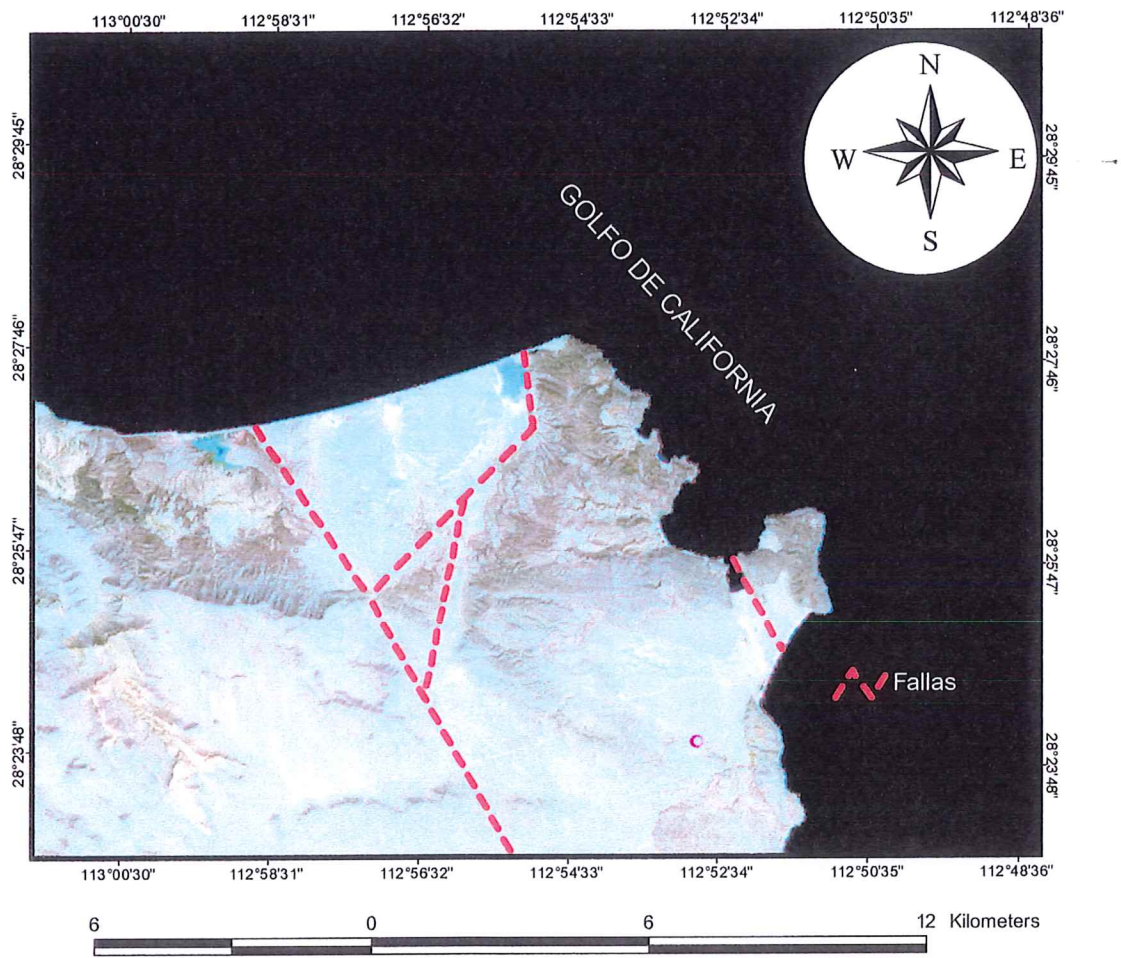
**Figura 8.** Imagen de Satélite LandSat ETM generada en falso color con la combinación de bandas 7, 4 y 1 de una porción de la parte norte de la península de Baja California.



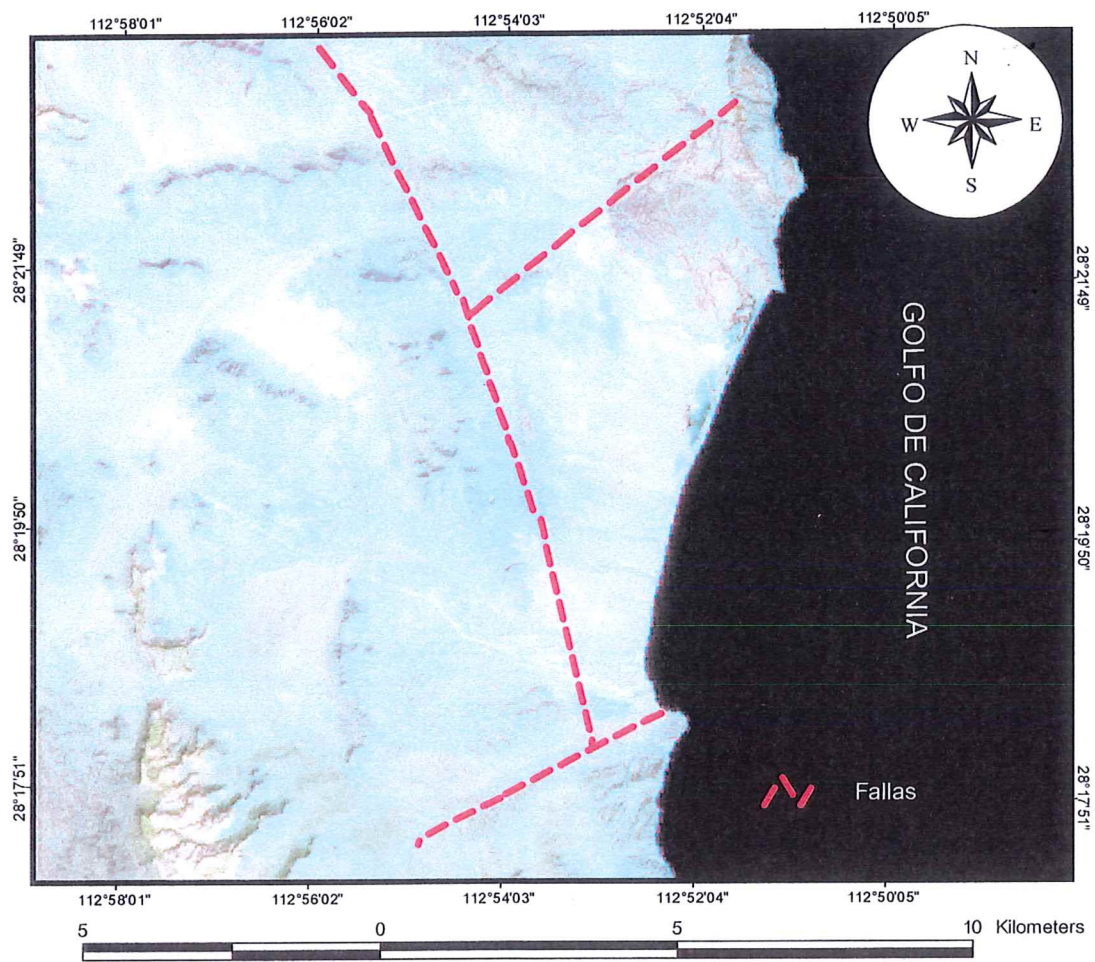
**Figura 9.** Imagen de Satélite LandSat ETM de la cuenca de Bahía de los Ángeles generada en falso color en las bandas 7,4 y 1, donde se observan las fallas y las sierras que rodean la cuenca: Sierra Libertad, Las Animas y Las Flores.



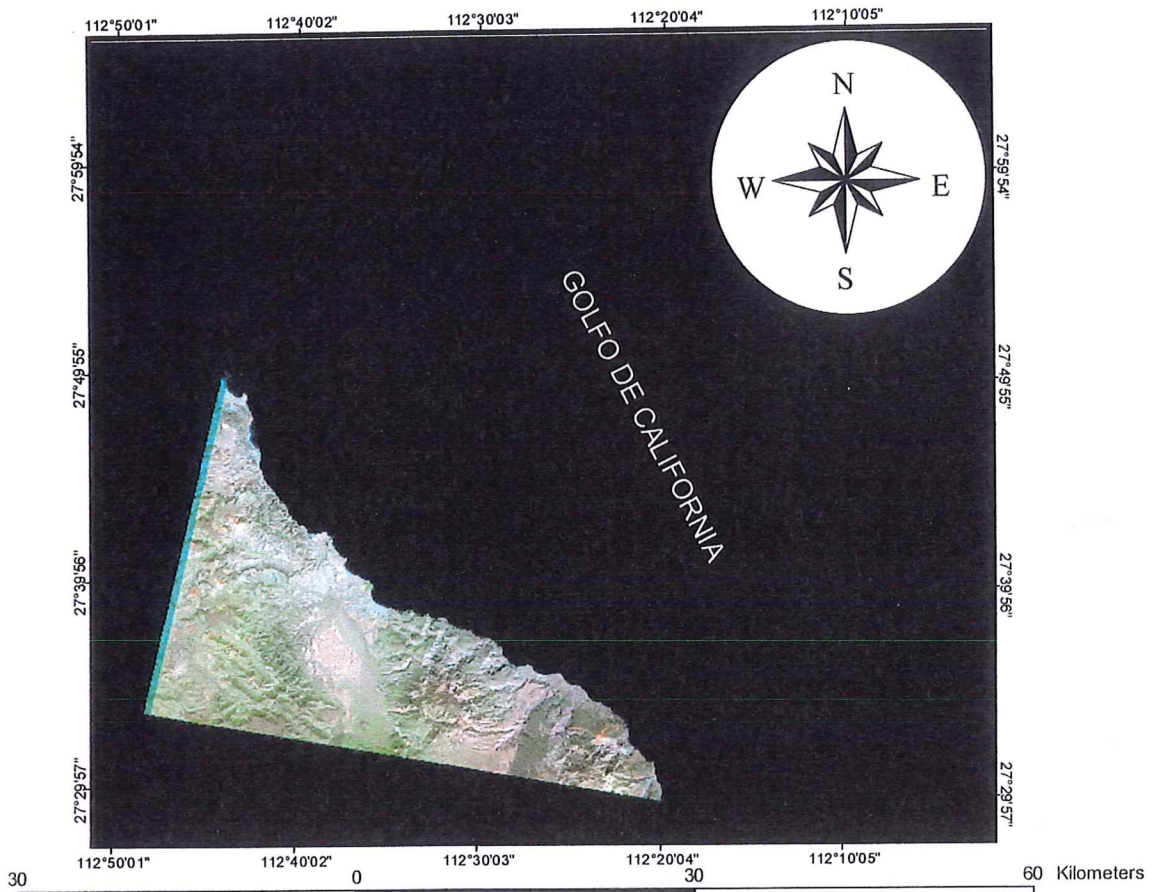
**Figura 10.** Imagen de Satélite ASTER generada en falso color con la combinación de bandas 5,3 y 1 de una porción norte de la península de Baja California.



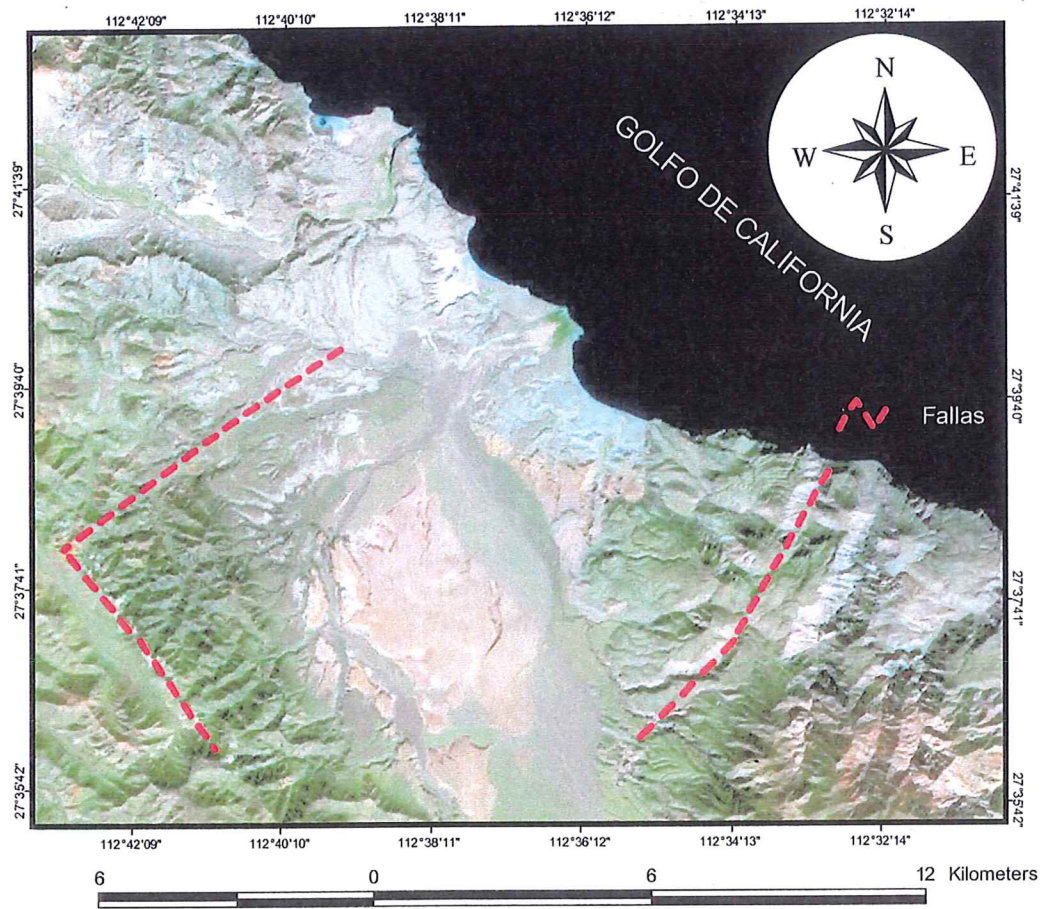
**Figura 11.** Imagen de Satélite ASTER de la cuenca de San Francisquito y Bahía San Rafael generada en falso color en las bandas 5,3 y 1.



**Figura 12.** Imagen de Satélite ASTER de la cuenca del Barril generada en falso color en las bandas 5,3 y 1.



**Figura 13.** Imagen de Satélite LandSat ETM generada en falso color con la combinación de bandas 7, 4 y 1 de una porción de Baja California Sur.

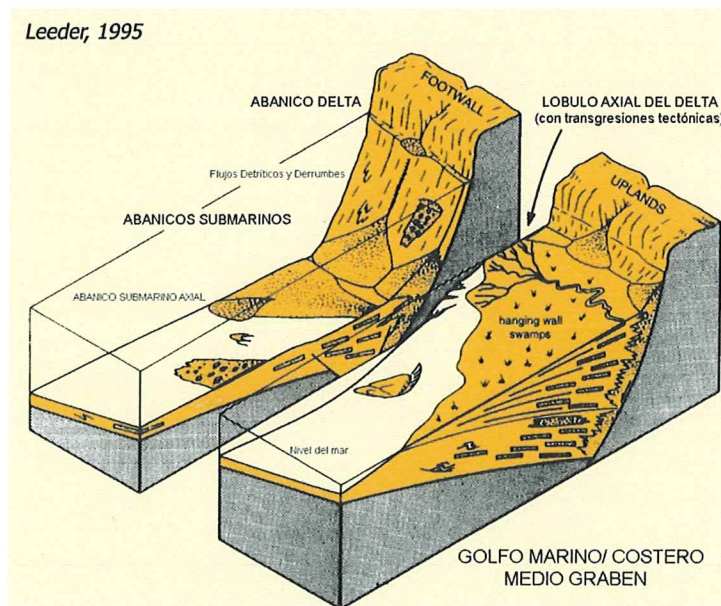


**Figura 14.** Imagen de Satélite LandSat ETM de la cuenca de Santa Ana en B.C.S generada en falso color en las bandas 7,4 y 1.

La historia neogénica en la parte central de Baja California registra actividad volcánica central y fisural ampliamente distribuida que cubre a un complejo basal formado por rocas metamórficas paleozoicas y graníticas del Cretácico (Delgado-Argote, 2000). Las unidades litológicas encontradas son similares en todas las cuencas, debido a los procesos antes mencionados, donde las principales rocas son de origen volcánico, principalmente andesita. Los depósitos marinos encontrados corresponden a edades del Mioceno tardío-Plioceno temprano, con lo cual se interpreta una transgresión global del nivel del mar, en la cual el levantamiento del mar se inicio hace 3.7 Ma con su máximo en 3.6 Ma, con una posición relativa del nivel del mar ligeramente por encima de los 50 m (Cande y Kent, 1995 en Ledesma- Vázquez, 2000). La extensión de una cuenca puede ser de unos cuantos metros a varios kilómetros de espesor. En el caso de las cuencas que encontramos en el Golfo de California son cuencas que van el orden de decenas de kilómetros, por ejemplo la de Puertecitos, Bahía de Los Ángeles, Bahía San Rafael, Las Animas, esto en la parte norte de la península de Baja California y en la parte sur encontramos la cuenca de Santa Rosalía, Loreto, San Nicolás, entre otras.

Los movimientos tectónicos y el vulcanismo, producen las modificaciones en la línea costa, así dando la geometría de la cuenca costera. El arreglo geométrico de las cuencas se debe a que esta dominada por un campo de fallas, en la cual sobresale la falla principal o maestra que es la que delimita a la cuenca; donde la mayoría de estas fallas son normales de rumbo en superficie, lo que indica que se asocian con extensión o compresión de la corteza y las cuencas tienen una orientación NNW. Las fallas maestras que delimitan o bien una zona de depresión o levantamiento (Mann et al., 1983),

pueden ser curvadas, trenzadas o en échelon, logrando producir una zona de depresión entre fallas (régimen transtensional) (Nilsen y McLaughlin, 1985), pudiendo ser rellenada con sedimentos cuyos espesores varían desde algunos pocos metros hasta miles de metros, esto es, pueden ser desde pequeñas lagunas, hasta regiones geográficas de cientos kilómetros de longitud (Ledesma- Vázquez, 2000). El elemento estructural básico de un rift continental se considera que es el medio graben, por lo cual la cuenca es asimétrica (Ingersoll y Busy, 1995 en Ledesma- Vázquez, 2000) Por lo cual se puede considerar al medio graben como una depresión que acumula sedimentos clásticos alóctonos o biogénicos y químicos y artiguennos (Leeder, 1995 en Ledesma- Vázquez, 2000) Una cuenca sedimentaria es rellenada principalmente por dos tipos de sedimentos aluvial o marino. Por lo que presentan una secuencia típica de una cuenca conocida como de mezcla, la cual presenta varias facies: abanico aluvial, planicie aluvial, abanico delta (fig. 16), las cuales se observan en las cuencas estudiadas.



**Figura 15.** Representación de las facies de una cuenca sedimentaria (Modificado de Leeder, 1995).

El límite de máxima inundación se tomo en relación a la distancia que existe entre la falla maestra y la línea de costa, lo cual se hizo para cada una de las cuencas. Para la cuenca de Bahía de los Ángeles es 5.8 km; la cuenca de San Francisquito es 5.9 km y la cuenca de Bahía San Rafael es 4.2 km; en la cuenca del Barril 3.4 km y en la cuenca de Santa Ana es 9 km.

Las cuencas de este estudio se localizan en la Provincia Extensional del Golfo; con la verificación de campo se corrobora la presencia de las cuencas extensionales del tipo medio graben, tal y como se esperaba en el modelo extensional del Golfo de California.

## CONCLUSIONES

Las aplicaciones de imágenes de satélite para la exploración geológica, demuestra que es una herramienta de gran ayuda para un análisis regional.

Las cuencas sedimentarias se originaron por la apertura del Golfo de California en el Mioceno, las cuales están dominadas por dos fases principales: procesos extensionales y transtensionales, es decir por la formación del Basin *and Range* en el Mioceno tardío 14-12 Ma y el desarrollo del límite de las placas del Pacífico y Norte América.

Las cuencas sedimentarias identificadas son: Bahía de los Ángeles, San Francisquito, el Barril y Santa Ana, las cuales se originaron por procesos extensionales y todas ellas se encuentran en la Provincia Extensional del Golfo. Los depósitos marinos y aluviales contenidos en las cuencas son del Mioceno, Plioceno y del Cuaternario y la litología encontrada es esencialmente de origen volcánico, principalmente andesita.

La posición de la falla maestra para las cuencas de medio graben representa el límite de inundación para el Neógeno. El límite de inundación fue 5.8 km para la cuenca de Bahía de los Ángeles; de 5.9 km para la cuenca de San Francisquito y de 4.2 km para la cuenca de Bahía San Rafael; de 3.4 km para la cuenca del Barril y de 9 km para la cuenca de Santa Ana.

## **REFERENCIAS:**

- Aguirre-Bielschowsky, I., 2005. Caracterización Litológica de la Cuenca San Clemente. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, 86 pp.
- Aragón-Arreola, M., M. Morando, A. Martín-Barajas, L. Delgado-Argote, A. González-Fernández. 2005. Structure of the rift basins in central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting. *Tectonophysics* 409: 19-38.
- Danemann, G. D. 2002. Participación local en la Administración Pesquera: Un análisis de políticas públicas y sistemas de actividades humanas enfocado al caso de Bahía de los Ángeles, Baja California. Tesis Doctoral. UABC.IIO- FCM, Ensenada, 240 pp.
- Danemann, G. D. 2004. Propuesta para la creación del Parque Nacional "Bahía de los Ángeles", Baja California. Tesis de Especialidad en Recursos Marinos. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, 154 pp.
- Delgado-Argote, L.A., 2000. Evolución Tectónica y Magmatismo del Neógeno de la Margen Oriental de Baja California Central. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, 175 pp.
- Delgado-Argote, L.A., M. López-Martínez, and M.C., Perillita. 2000. Geologic Reconnaissance and Miocene age of volcanism and associated fauna from sediments of Bahía de los Angeles, Baja California, Central Gulf of California, in H. Delgado, G. Aguirre and J. Stock, editors, *Cenozoic Tectonics and Volcanism of México*, Geological Society of America Special Paper 334, p. 111-121.

- Dorsey, R.J., P.J. Umhoefer, S.C. Ingle, L. Mayer. 2001. Late Miocene to Pliocene stratigraphic evolution of northeast Carmen Island, Gulf of California: Implications for oblique-rifting tectonics. *Sedimentary Geology* 144: 97-123.
- Escalona-Alcázar, F.J., L. A. Delgado-Argote, M. López-Matínez, G. Rendón Márquez. 2001. Late Miocene volcanism and marine incursions in the San Lorenzo Archipelago, Gulf of California, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 18:111-128.
- Escalona-Alcázar, F.J., L. A. Delgado-Argote. 2000. Estudio de deformación en las Islas San Lorenzo y Las Animas, Golfo de California: Implicaciones sobre su desplazamiento como bloque rígido desde el Plioceno Tardío. *GEOS* 20:6-20.
- García-Duga, J.L. 2000. Geomorfología e Hidrología superficial entre Puertecitos y San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en sensores remotos y modelos digitales de elevación. Tesis de Maestría. CICESE, División Ciencias de la Tierra. Ensenada, pp. 101.
- Helenes, J. and A.L. Carreño. 1999. Neogene sedimentary evolution of Baja California in relation to regional tectonics. *Journal of South American Earth Sciences* 12: 589-605.
- Henry, C.D. 1998. Basement-controlled transfer zones in an area of low-magnitude extension, eastern Basin and Range province, Trans-Pecos Texas. *Geological Society of America Special Paper* 323: 75-88.
- Iñiguez-Hernández, L. 2004. Análisis de distribución y tamaño de las congregaciones de tiburón Ballena *Rhincodon typus* durante la temporada

- 2003 en Bahía de los Ángeles, B.C. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, 81 pp.
- Kious, W.J., R.I. Tilling. This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics. USGS. USA, 2007.
- Ledesma-Vázquez, J., 2000. Cuencas Sedimentarias del Plioceno en el Golfo de California; Cuenca San Nicolás, Baja California Sur. Tesis Doctoral. IIO- FCM, Ensenada, 160 pp.
- Lee, J., M. M. Miller, R. Crippen, B. Hacker, J. Ledesma-Vázquez. 1996. Middle Miocene extension in the Gulf Extensional Province, Baja California: Evidence from Southern Sierra Juarez. GSA Bulletin 108, 505-525 pp.
- Leeder, M.R. 1995. Continental Rifts and Proto-Oceanic Rift Troughs. In: Busby, C. and Ingersoll, R.V (Eds). 1995. Tectonics of Sedimentary Basins. Blackwell Science. USA, 119-148 pp.
- Lillesand, T. and R. W. Kiefer. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. 3<sup>th</sup> edition. John Wiley and Sons Inc. USA, 749 pp.
- Lonsdale, P., 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California. In: Hussong, D., Winterer, E.L., Decker, R.W. (Eds), The Eastern Pacific Ocean and Hawaii (The Geology of North America, N). Geological Society American, Boulder, CO, 499-521 pp.
- Ochoa-Landín, L, Ruiz, J., Calmus, T., Pérez-Segura, F., y Escandón, F. 2000. Sedimentology and Stratigraphy of Upper Miocene El Boleo Formation, Santa Rosalía, Baja California, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 17: 2. 83-96.

- Rendón- Márquez, G., 1992. Estratigrafía de los depósitos Marinos del Neógeno en la Región de Puertecitos, Noroeste de Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, 59 pp.
- Siegal, B.S. and A.R. Gillespie. 1980. Remote Sensing in Geology. John Wiley and Sons Inc. USA, 702 pp.
- Stewart, J.H. 1998. Regional characteristics, tilt domains, and extensional history of the late Cenozoic Basin and Range province, western North America. Geological Society of America Special Paper 323: 47-74.
- Stock, J.M. and K.V. Hodges. 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and transfer of Baja California to the Pacific plate. Tectonics 8:99-115.
- Umhoefer, P. J. and K.A Stone. 1996. Description and kinematics of the SE Loreto basin fault array, Baja California Sur, Mexico: A positive field test of oblique-rift models. Journal Structural Geology 18:595-614.
- Zanchi, A. 1994. The opening of the Gulf of California near Loreto, Baja California, Mexico: from basin and range extension to transtensional tectonics. Journal Structural Geology 16:1619-1639.